

Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный университет»

Математико-механический факультет

Кафедра Астрофизики

Краяни Хуссейн

Поляризационное исследование глобул Бока

Дипломная работа

Допущена к защите.
Зав. кафедрой:
(д.ф.-м.н., проф.) Гаген-Торн В.А.

Научный руководитель:
(д.ф.-м.н., проф.) Ильин В.Б.

Рецензент:
(к.ф.-м.н., зав. лаб. ГАО РАН) Архаров А. А.

Санкт-Петербург

2016

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY
Mathematics & Mechanics Faculty

Chair of Astrophysics

Krayani Hussein

Polarimetric investigation of Bok globules

Graduation Thesis

Admitted for defence.
Head of the chair:
(Professor) Vladimir Hagen-Torn

Scientific supervisor:
(Prof.) Vladimir Il'in

Reviewer:
(candidate of sciences, head of laboratory, MAO RAS) Arkadij Arkharov

Saint Petersburg

2016

Содержание

1. Введение	3
2. Наблюдения	9
3. Обработка наблюдений	12
3.1. Базовая обработка изображений	12
3.1.1 Обрезание полей и удаление “плохих” пикселей	12
3.1.2 Создание <i>master bias</i>	13
3.1.3 Создание <i>master flat</i>	14
3.1.4. Коррекция изображений	15
3.2. Обработка поляриметрических стандартов	16
3.3. Обработка данных для BHR 113	19
4. Результаты	21
4.1. Поляриметрические карты	21
4.2. Определение спектрального класса и расстояний	25
до звезд и поглощения A_V	
4.2.1 Истинные цвета и процедура интерполяции	25
4.2.2 Фотометрическая данные из различных каталогов	26
4.2.3 Фотометрическое JHK исследование звезд	28
4.3 Связь поляризации и поглощения в области BHR113	31
5. Заключение	33
Список литературы	34

1. Введение

Работа посвящена поляриметрическому исследованию глобул Бока. Глобулы – небольшие изолированные темные облака, состоящие в основном из молекулярного газа и пыли. Эти облака являются местами образования маломассивных звезд (см., например, Schultz, 2012).

Многие важные детали процесса образования звезд являются до сих пор неясными. Например, не понятно даже, почему некоторые глобулы содержат протозвездные объекты, в то время как многие другие имеют ядра без протозвезд.

В процессе образования звезд важнейшую роль играют магнитные поля, вращение облаков и другие сложные физические явления. Поэтому моделирование процесса звездообразования является трудной задачей, и ее понимание и решение происходит крайне медленно. Как следствие, по-прежнему необходимы более детальные данные, как о внутренних областях глобул, так и об их внешних слоях и окружающей среде.

Сегодня развивается несколько подходов к изучению магнитных полей и пыли во внешних слоях и в ближней окрестности межзвездных молекулярных облаков. Некоторые из этих подходов основываются на анализе поляризации излучения звезд фона.

Пыль в межзвездной среде, и в частности, в глобулах поглощает и рассеивает падающее излучение и частично перерабатывает его в тепловое излучение, при этом происходит поляризация излучения (см., например, Whittet, 2003; Draine, 2011). Как следствие, свойства пыли можно определять по кривой межзвездного поглощения, наблюдаемой для звезд фона, кривой межзвездной поляризации для таких же звезд и спектру теплового излучения пыли. Специфическая ориентация несферических космических пылинок, вызывающая поляризацию (Andersson et al., 2015), позволяет получить информацию о направлении магнитного поля: поляризации в видимой области

параллельна направлению магнитного поля, а в далекой ИК области перпендикулярна этому направлению (Draine, Fraisse, 2009).

Тесная связь излучения, пыли и магнитных полей дает основу для следующих *наблюдательных подходов*, которые мы можем в принципе применять и к глобулам (Crutcher, 2012):

Подход 1 -- Получение поляризационных карт в видимой и ближней ИК области, что позволяет определять направление, топологию и методом Чандрасекара-Ферми силу магнитного поля.

Подход 2 -- Получение поляризационных карт в широком диапазоне спектра -- от оптической до суб-мм области, что дает информацию о магнитных полях в областях с разной плотностью.

Подход 3 -- Получение волновых зависимостей поглощения и поляризации фонового излучения, дающих сведения о средних свойствах пылевых частиц.

Перечисленные наблюдательные данные должны быть дополнены по возможности другими данными:

- а) картами (и спектрами) глобул в различных молекулярных линиях;
- б) картами распределение межзвездного поглощения в области глобулы;
- в) картами распределения интенсивности теплового излучения пыли;
- г) информацией о крупно-масштабном распределении вещества и магнитных полей направлений глобулы и т.д.

Во всех трех описанных выше подходах, исключая суб-мм поляризацию, мы в основном имеем дело с нейтральным гало глобул и областями вне глобул и в меньшей степени с внешними молекулярными слоями.

Изучение гало глобул и вообще областей перехода молекулярного водорода в атомарный является трудной задачей, которая рассматривалась лишь в нескольких работах (см. Wannier et al., 1999; Goldsmith et al., 2007; Stanimirovic et al. 2014 и т.д.).

На сегодняшний день известно, что поглощение A_V в гало глобул составляет 0.5--1 зв. вел., концентрация частиц 30--50 см^{-3} , температура 30--60 К. Размер гало примерно в 3 раза больше размера видимого изображения глобулы. Гало имеет неоднородную структуру и сложную форму (см., например, рис. 1).

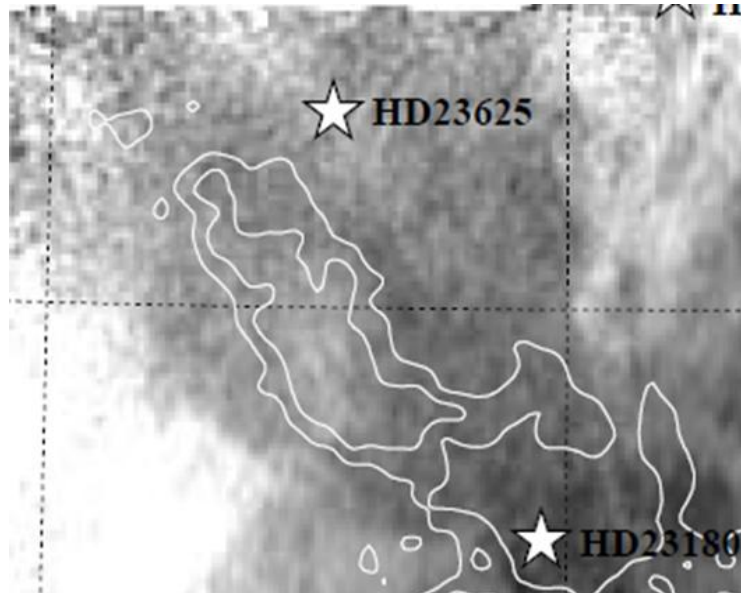


Рис. 1: Распределение эмиссии в линии HI 21 см в гало глобулы B5 (показана белым контуром) из работы Wannier et al. (1999).

Основной трудностью перечисленных подходов является неясный вклад гало, поскольку трудно разделить вклады: 1) диффузного вещества перед глобулой, 2) гало глобулы, 3) других облаков в локальной межзвездной среде ($d < 500$ pc) и 4) далекого вещества ($d > 500$ pc). Однако когда мы рассматриваем близкие ($d < 150$ pc), высокоширотные глобулы вклад первого и последнего является минимальным. Современные трехмерные карты распределения вещества в локальной межзвездной среде становятся все более надежными (см. Lallement et al., 2014; Puspitarini et al., 2014), однако определение вклада гало все-таки всегда представляет собой определенную проблему.

Рассмотрим результаты, достигнутые при применении трех описанных подходов.

Подход 1. Получение поляризационных карт глобул в видимой и ближней ИК области было начато в пионерских работах 1980-х годов (см., например, Jones et al., 1984; Joshi et al., 1985). Подобным образом глобулы систематически изучались группой Д. Клеменса (см., например, Kane, Clemens, 1994; Clemens, 2012). Существенный вклад был внесен несколькими группами из Индии (см., например, Bhatt et al., 2004; Eswaraiah et al., 2013), а также группой из Бразилии (см. Rodrigues et al., 2014).

Детальные поляризационные карты (более 30 векторов поляризации) были однако пока получены лишь для 20 глобул. Это число сравнительно велико, но, очевидно, недостаточно для статистического анализа.

Как оказалось, для большинства глобул окружающие магнитные поля имеют регулярную структуру. Однако для примерно 20% глобул эти поля имеют сложный или нерегулярный характер (см. Rodrigues et al., 2014). Причины это до сих пор непонятны.

Другие результаты, полученные при применении этого подхода, хорошо резюмированы в недавнем обзоре Li et al. (2014). Найдено, что, по-видимому, совместное действие гравитации и турбулентности определяет форму глобул и их ядер (вытянуты в основном или параллельно, или перпендикулярно направлению магнитного поля). Поле в облаках “помнит” направление галактического магнитного поля. Протозвездные диски и молекулярные течения, по-видимому, не являются ориентированными этим полем и т.д.

Подход 2. Сравнение поляризационных карт, полученных в видимой, ближней ИК и суб-мм областях спектра, является сравнительно новым направлением исследований (см., например, Reiss et al., 2014). Пока найдено лишь, что поляризация в ближней ИК области, по-видимому, более или менее согласуется с поляризацией в видимой области (см., например, Alves et al., 2014; Cashman, Clemens, 2014), а поляризация в суб-мм области обычно имеет существенно более сложную топологию (см., например, Hull et al., 2013). Новые горизонты открыли данные, полученные на космической обсерватории Planck (см., например, Draine, 2015; Planck collab., 2016).

Подход 3. Зависимость поляризации от длины волны была получена для нескольких сравнительно крупных темных облаков в 1990-х (см., например, Vrba et al., 1993) и только лишь для пары глобул, поскольку это является более трудной задачей. Например, в недавней статье Eswaraiah et al. (2013) удалось получить в основном данные о поляризации в полосах V, R и I, что очевидно недостаточно для анализа зависимости поляризации от длины волны, когда, как предполагается, максимум этой зависимости должен быть на длине волны более 0.6 мкм.

В целом ожидается, что средний размер пылинок в глобулах должен быть больше, чем в диффузной межзвездной среде, хотя известные механизмы роста пылинок, вероятно, в глобулах не работают (Forster et al., 2013).

В данной дипломной работе в какой-то степени предполагается развить все 3 описанные выше подходы. В дополнение к имевшимся поляризационным картам глобулы южного неба BHR 113 в полосах I и H (Magalhaes, 2012) были получены и полностью обработаны поляризационные карты этой же глобулы в полосах B, V и R. Основные этапы и результат этой обработки описаны в Главе 2. Для более полной интерпретации полученных данных проведена фотометрическая спектральная классификация наблюдавшихся звезд, этапы, результаты и следствия которой описаны в Главе 3. Для решения этой задачи был дополнен имеющийся комплекс программ и собраны фотометрические данные о звездах в имеющихся обзорах неба и каталогах (UCAC4, 2MASS, DENIS и др.). Описана классификация звезд по данным 2MASS, которая позволила оценить расстояние до и поглощение в направлении звезд, для которых была получена зависимость поляризации от длины волны. Кратко обсуждается сопоставление параметров кривых межзвездного поглощения и поляризации проведено в первом приближении. В последующем оно должно дать сведения о свойствах пыли и магнитных полей в ближней окрестности и во внешних слоях глобул. Заметим, что глобула BHR 113 пока единственная, для которой получены детальные поляризационные карты в полосах I и H.

2. Наблюдения

Поляриметрические наблюдения глобул Бока были проведены 17-21 апреля 2015 года в обсерватории Пико дос Диас в Бразилии. Эта обсерватория основана Национальной Астрофизической Лабораторией Бразилии в 1980 году в 37 км от города Итажуба, в штате Минас-Жервайс, в 300 км от города Рио-де-Жанейро. Обсерватории находится на высоте 1864 м и имеет координаты: широта $-22^{\circ} 32' 04''$ и долгота $+45^{\circ} 34' 57''$.



Рис. 2: Обсерватория Пико дос Диас.

Обсерватория Пико дос Диас оснащена несколькими телескопами. Наши наблюдения проводились на 60-см телескопе Boller & Chivens (см. рис. 3). Это телескоп-рефлектор с оптической схемой Ричи — Кретьена, фокусное расстояние равно $f/13.5$. Данный телескоп имеет достаточно большое поле зрения, равное 11×11 угловых минут.

При поляриметрических наблюдениях использовалась полуволновая пластинка. Углы поворота фазовой пластины принимают следующие значения: 0° , 22.5° , 45° , 67.5° .

Из пяти выделенных наблюдательных ночей часть времени оказалась потеряна вследствие плохих погодных условий, а именно ночь с 21 на 22 апреля полностью и ночи с 19 на 20 и с 20 на 21 апреля частично. В течение оставшегося наблюдательного времени мы сумели получить поляриметрические данные для нескольких глобул Бока, в том числе для

выбранной нами глобулы BHR 113 в В, V, R фильтрах.

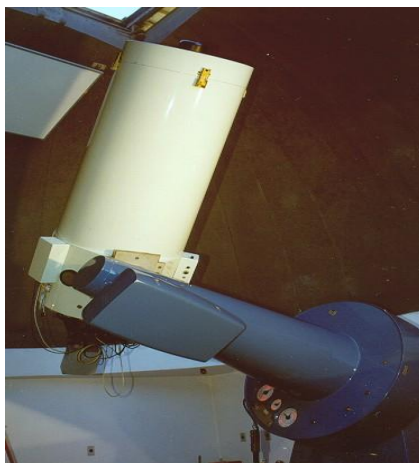


Рис. 3: Телескоп Boller & Chivens обсерватории Пико дос Диас

Глобула Бока BHR 113 (см. рис. 4) находится в южном небе, ее координаты: прямое восхождение – 16:12:43, склонение – -52:15:36.

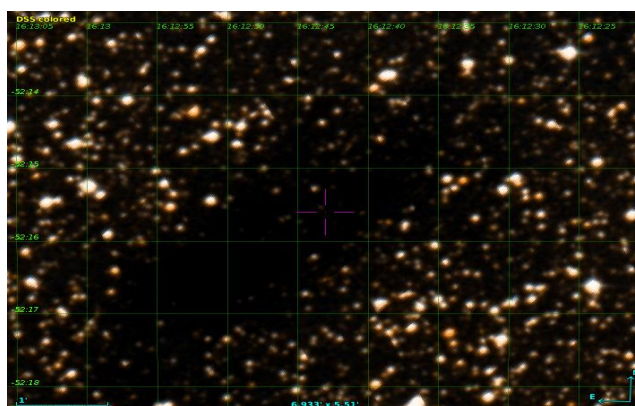


Рис.4: Глобула BHR 113

Как и остальные глобулы Бока, BHR113 является небольшим межзвездным облаком, состоящим в основном из молекулярного газа и пыли. Глобула имеет несферическую форму и вытянута с юго-запада на северо-восток. Ее угловой размер составляет порядка 10 arcmin.

Кроме звезд около глобулы, мы провели поляризметрические наблюдения стандартов – звезд с хорошо известной степенью поляризации. Обычно наблюдают несколько “неполяризованных” стандартов (звезд со степенью

поляризации, близкой к нулю) и несколько “сильно поляризованных” стандартов (звезд с достаточно большой степенью поляризации). Стандарты наблюдаются для того, чтобы проверить, правильно ли работают телескоп и его приборы, имеются ли систематические ошибки в измерении степени поляризации, а также, чтобы определить точку отсчета для позиционного угла. Мы выбрали 5 сильно поляризованных поляриметрических стандартов (HD 80558, HD 111613, HD 292323, HD 147084 и HD 110984 – см. рис. 5) и 3 неполяризованных (HD 94851, HD 97689 и HD 98161 – см. Рис. 6).

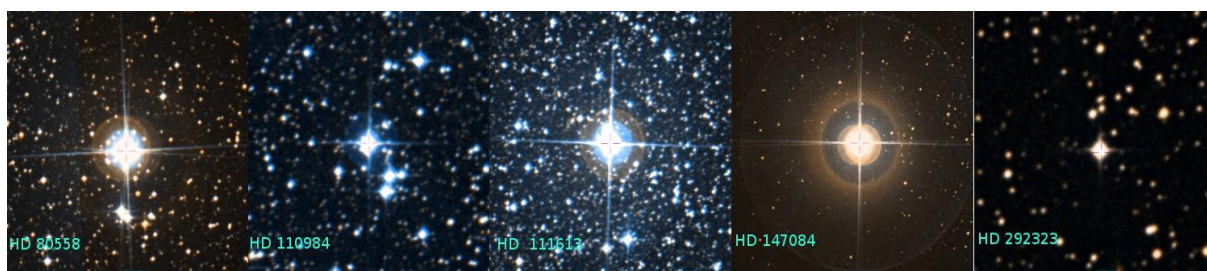


Рис.5: Поляризованные стандарты

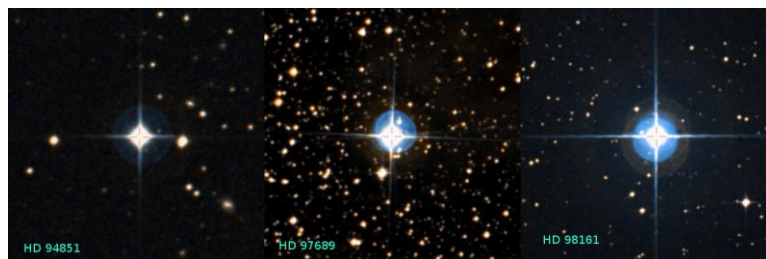


Рис.6: Неполяризованные стандарты

Каждую ночь вместе с наблюдениями объектов мы проводили наблюдения звезд-стандартов. Наблюдения стандартов проводились, как и для наших объектов, в трех полосах: В, V и R.

Также каждую ночь наблюдений были получены файлы *bias* и *flat*, необходимые для обработки изображений с объектами.

3. Обработка наблюдений

3.1. Базовая обработка изображений

Обработку наблюдательных данных мы проводили с помощью пакета IRAF (Image Reduction and Analysis Facility). Первая часть работы представляет собой базовую обработку полученных нами изображений. Она используется для того, чтобы очистить изображения от возможных шумов и искажений, полученных из-за несовершенства детектора. В базовую обработку входит обрезание пустых полей изображений (если такие есть), удаление "плохих" пикселей, исправление аддитивных (шум считывания) и мультипликативных (неоднородности поля матрицы) ошибок в ПЗС-данных. Базовая обработка должна проводиться для всех изображений, полученных с помощью ПЗС-матрицы.

Можно выделить 4 этапа базовой обработки изображений:

1. Определение частей изображения, которые надо обрезать. Мы должны обрезать края изображений с большим шумом или те части, в которых нет "сигнала".
2. Определение областей с "плохими" пикселями. Здесь необходимо создать файл, описывающий расположение "плохих" пикселей.
3. Создание master bias или "нулевого изображения" для исправления шума считывания.
4. Создание master flat-field изображения для исправления неоднородностей поля ПЗС матрицы.

3.1.1. Обрезание полей и удаление "плохих" пикселей

Анализ изображений показал, что обрезать ничего не требуется. Однако в изображениях объектов и кадрах плоского поля присутствуют "плохие пиксели" (черная полоса в левой части изображения сверху см. Рис. 7). Чтобы исключить "плохие" пиксели, нужно создать файл-маску определенного формата, в

котором описывается местоположение (координаты) "плохих" пикселей. Такой файл можно создать вручную (если область имеет правильную форму, как в нашем случае, и координаты "плохих" пикселей легко определить) либо воспользоваться командой IRAF *ccdmask* (если областей "плохих" пикселей несколько, они неправильной формы). Для автоматического создания файла-маски необходимо иметь два набора flat-файлов с разной степенью освещенности. Для коррекции наших наблюдательных данных мы пробовали использовать оба способа и в обоих случаях получили нужный результат (см. Рис. 8)

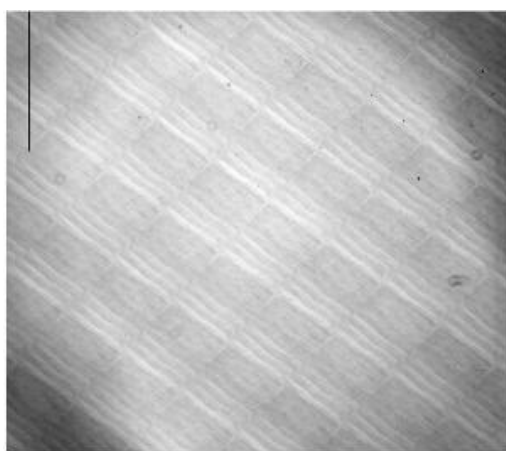


Рис. 7 "Плохие пиксели"

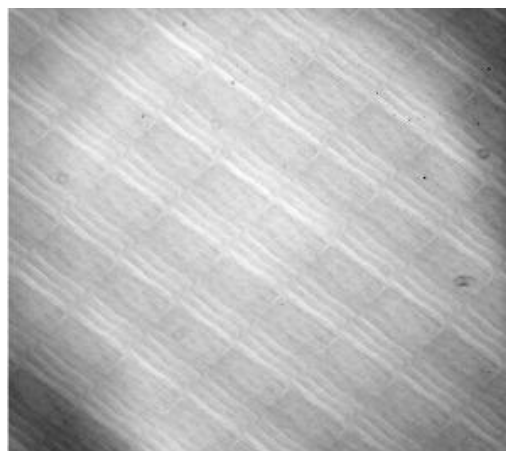


Рис. 8 Без "плохих" пикселей

3.1.2. Создание master bias

Bias изображения должны сниматься с закрытым затвором и с очень коротким ("нулевым") временем экспозиции. Эти изображения и изображения, полученные для объекта, должны иметь одинаковые параметры чтения, так как эти параметры модифицируют схему распределения шума считывания вдоль изображения, т.е. такие параметры как бинирование, частота, скорость чтения и другие.

Master bias делается следующим образом:

1. Сначала создается файл списка, в котором перечислены все bias изображения.
2. С помощью команды IRAF *zerocombine* комбинируем все изображения.

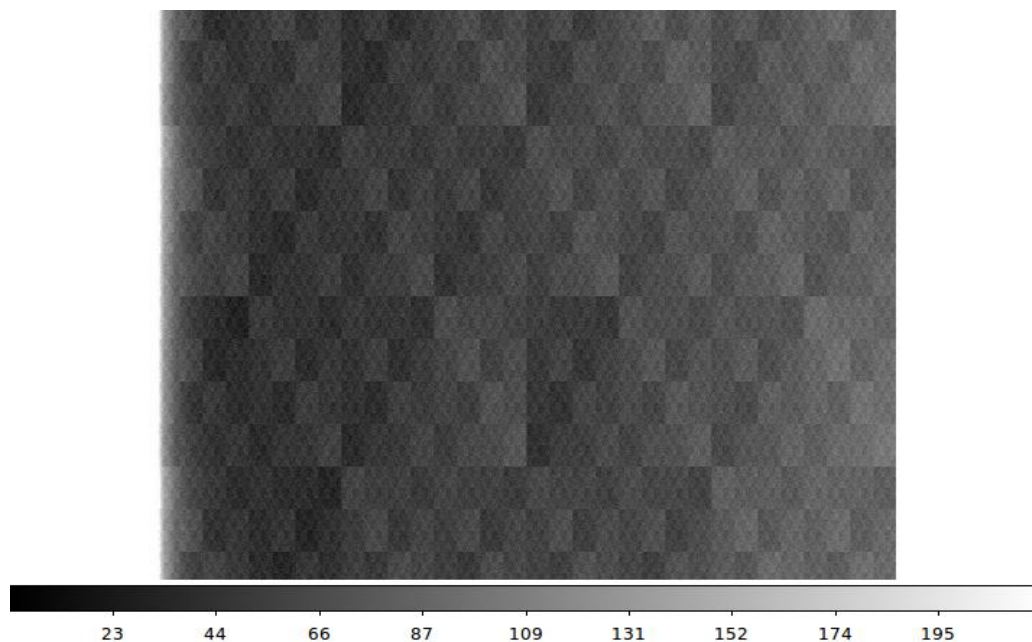


Рис. 9 Master Bias

Для каждой наблюдательной ночи мы делаем один master bias и потом комбинируем их снова между собой, чтобы получить master bias для всего периода наблюдений. В нашем случае было отснято порядка 300 файлов bias в каждую ночь наблюдений. В результате у нас получился master bias очень хорошего качества (см. рис. 9).

3.1.3. Создание master flat

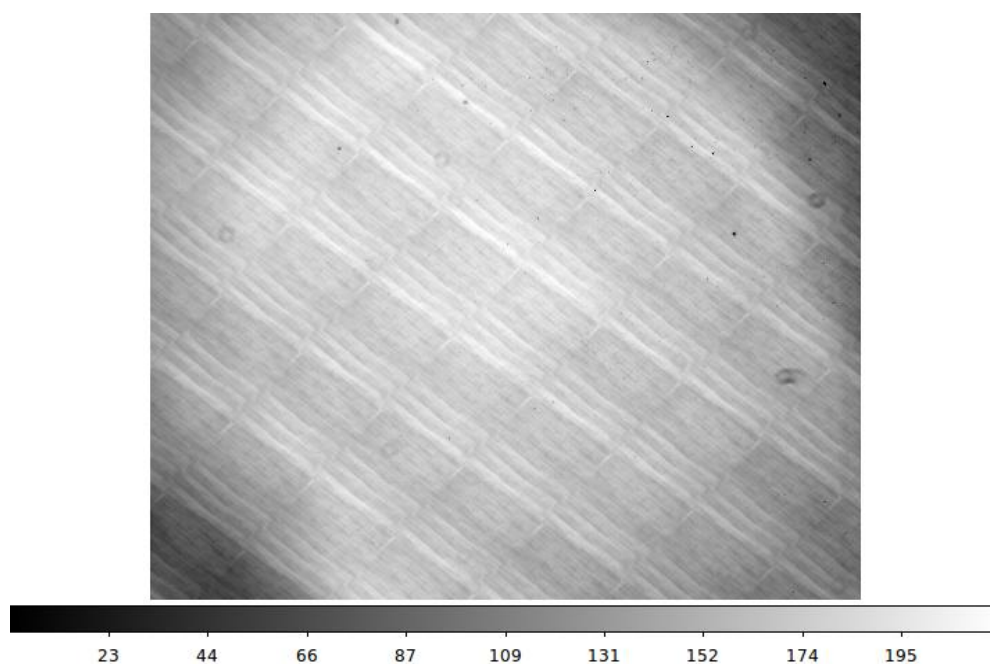


Рис. 10 Flat field файл для полосы В.

Flat-field файлы (файлы плоского поля) представляют собой изображения, полученные при равномерной засветке ПЗС матрицы (используется освещенный лампой белый экран или закрытый купол либо область неба ранним вечером или поздним утром, когда звезд еще/уже не видно). В этом случае любая разница в подсчете фотонов будет следствием различной чувствительности (или освещенности) самого пикселя. Причиной различного квантового выхода пикселей может быть неравномерная засветка матрицы из-за пылинок и грязи на поверхности матрицы.

Для поляриметрических наблюдательных данных *flat-filed* изображения должны быть получены для каждого фильтра отдельно, при этом на телескопе должен быть настроен режим для поляриметрических наблюдений. Файл *master flat-field* также создается для каждого фильтра.

Так же как и для *master bias* вначале создаем список, содержащий имена всех изображений плоского поля в данном фильтре. Затем комбинируем файлы с помощью команды IRAF *flatcombine*. Используя команды IRAF *imstat*, *implot*, *display*, сравниваем получившийся *master flat* с отдельными необработанными *flat*-кадрами. Анализируем, присутствуют ли на изображении эффекты виньетирования и пригодны ли получившиеся файлы для использования. Этот процесс делается для каждой наблюдательной ночи отдельно. Следует сравнить усредненные *flat* кадры для всех ночей путем деления их друг на друга. Если *flat*-кадры для каждой ночи близки, то мы комбинируем все эти *flat* кадры в один *master flat*. В противном случае используем для каждой ночи свой файл. Для обработки наших наблюдательных данных мы использовали для каждой ночи свой *master flat*.

3.1.4. Коррекция изображений

После создания *master bias* и *master flat* можно использовать эти файлы для исправления наших изображений. Из всех изображений с объектами и кадров плоского поля мы вычитаем *master bias*. Все кадры с изображением объектов делятся на плоское поле (файл *master flat*). Для вышеупомянутой коррекции

изображений используется команда *ccdproc* из пакета IRAF. В параметрах данной команды указываем, какую коррекцию мы хотим произвести (нужно ли обрезать поля, если да, то размеры вырезаемой области; нужно ли удалять "плохие" пикселы, если да, то указываем файл-маску для "плохих" пикселов; нужно ли вычитать нулевой кадр, если да, то указываем файл master bias; нужно ли исправлять за плоское поле, если да, то указываем файл master flat).

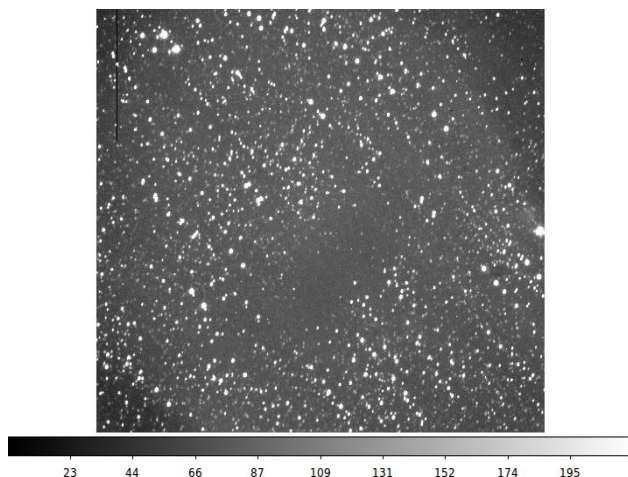


Рис. 11 Кадр до обработки

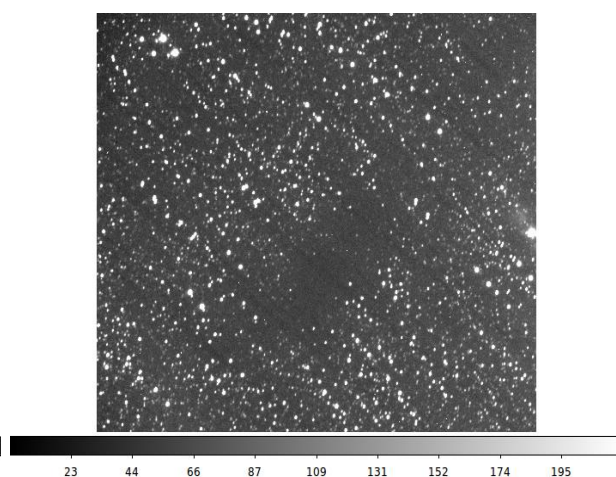


Рис. 12 Кадр после обработки

После выполнения команды *ccdproc*, командой *ccdlist* можно проверить, какие коррекции были проведены для каждого файла из списка. На рисунках 11 и 12 приведен пример кадра с изображением одного поляриметрического стандарта до и после обработки.

3.2. Обработка поляриметрических стандартов

Для каждого стандарта мы получили 16 изображений, по 4 в каждой из четырех позиций фазовой пластины. Такой подход, предложенный бразильскими коллегами, позволяет добиться большей точности результатов.

В этом случае (см. рис. 13) мы можем помимо стандартно рассчитываемой наблюдательной ошибки для степени поляризации получить ошибку (*SIGMA_{th}*), оценив среднеквадратичное отклонение от построенной функции амплитуды модуляции.

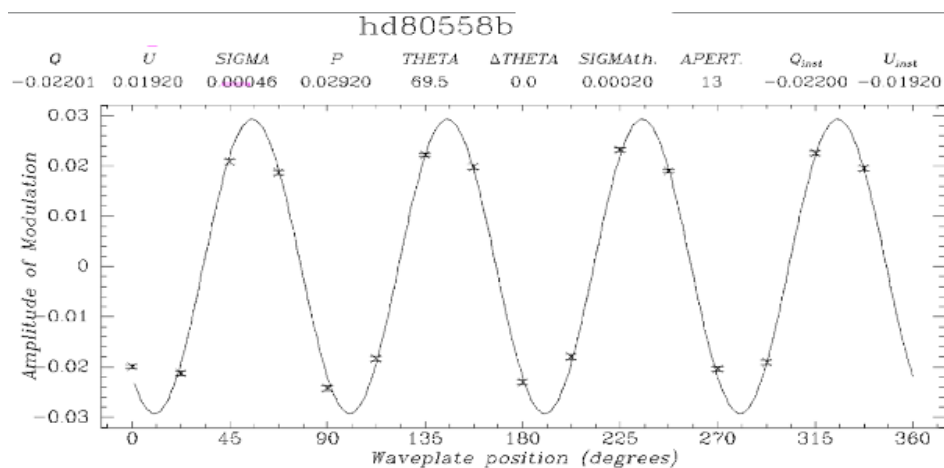


Рис. 13 Зависимость амплитуды модуляции от позиции фазовой пластины

Обработка изображений поляриметрических стандартов и расчет степени поляризации и позиционного угла производился нами с помощью команды *padrao_pol* из дополнительного пакета программ *pcsdpack_inpe* для IRAF, написанного бразильскими коллегами. Данный пакет позволяет существенно упростить и сделать более быстрой обработку поляриметрических наблюдательных данных.

На первом этапе обработки определяется сдвиг между двумя изображениями одной и той же звезды на кадре по горизонтальной и вертикальной осям. Далее по первому кадру в списке составляется список изображений звезд с координатами (в случае обработки стандарта список будет состоять из двух изображений одной звезды). Используя значения сдвига, полученные на первом этапе, разбиваем полученный список изображений звезд на пары (объединяя изображения, принадлежащие одной и той же звезде). На следующем этапе определяем смещение по координатам между кадрами. Это позволит нам получить координаты звезд из списка на других кадрах. После получения координат звезд на всех кадрах вычисляем звездные величины звезд.

Для вычисления звездных величин звезд используется пакет IRAF *daophot*, позволяющий рассчитывать звездные величины звезд с высокой точностью. Величины звезд рассчитываются для нескольких апертур, из которых впоследствии выбирается апертура, при которой ошибка вычисления звездной

величины минимальна. На последнем этапе вычисляются степень

поляризации P и позиционный угол θ :

$$P = \sqrt{(Q^2 + \sqrt{U^2})} \quad \text{и} \quad \theta = \frac{1}{2} \arctan(U / Q)$$

Трудность при обработке изображений с объектами составляет отождествление на снимке нужной звезды, поскольку при поляриметрических наблюдениях каждая звезда на кадре имеет два изображения, которые могут накладываться на изображения других звезд, вдобавок кадр может быть повернут и/или зеркально отражен в горизонтальной или вертикальной плоскости.

Для облегчения отождествления мы сравнивали изображение, полученной при наблюдениях с изображением объекта в программе *aladin* (см. рис. 14 и 15).

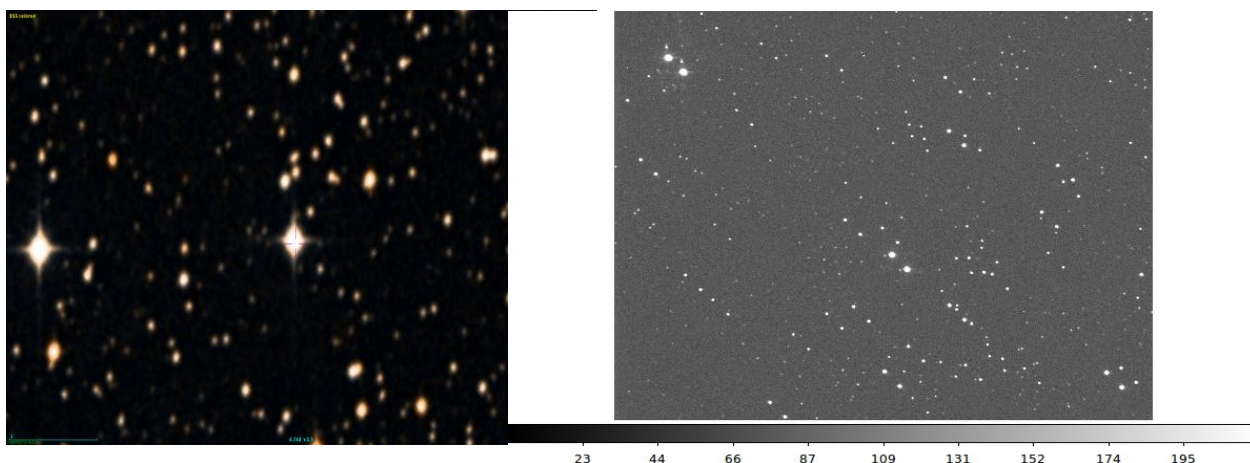


Рис. 14 HD 292323 на aladin.

Рис. 15 HD 292323 на ds9

Результаты наблюдений поляриметрических стандартов приведены в таблице 1. Значения степени поляризации достаточно хорошо совпадают с полученными ранее результатами, что говорит о том, что телескоп и инструменты работали правильно. Значения, полученные для наших стандартов ранее: HD 80558: $P_V = 3.32 \pm 0.02\%$, $\theta_V = 162^\circ$ (Hsu and Breger (1982), Bastien (1988)); HD 111613: $P_V = 3.14 \pm 0.06\%$, $\theta_V = 81^\circ$ Hsu and Breger (1982), Dolan and Tapia (1986)); HD 298323: $P_V = 5.23 \pm 0.009\%$, $\theta_V = 148.6^\circ$ (Turnshek, 1990); HD 110984: $P_V = 5.7 \pm 0.007\%$, $\theta_V = 91.6^\circ$ (Turnshek, 1990); HD 147084: $P_B = 3.5 \pm 0.01\%$,

$\theta_B=32^\circ$, $P_V=4.18\pm0.02\%$, $\theta_V=32^\circ$ Dolan and Tapia (1986); HD 94851: $P_B=0.057\pm0.018\%$ (Turnshek, 1990); HD 98161: $P_B=0.017\pm0.006\%$ (Turnshek, 1990); HD 97689: $P_B=0.16\pm0.04\%$, $P_V=0.14\pm0.08\%$ (Fossati, 2007).

3.3. Обработка данных для BHR 113

Для глобулы BHR 113 мы получили по 8 изображений в В и R полосах и 16 изображений в V полосе. Обработка кадров с объектами производилась нами с помощью команды *auto_pol* из пакета программ для IRAF *pccdpack_inpe*, написанного нашими бразильскими коллегами. Данная команда работает подобно команде *padrao_pol* для обработки стандартов. Отличие заключается в том, что *padrao_pol* работает только с одной звездой-стандартом, а *auto_pol* обрабатывает сразу большое количество звезд. После вычисления значений степени поляризации и позиционного угла запускаем команду *coords_real* из пакета *pccdpack_inpe*, чтобы перевести координаты CCD-изображения x , y в реальные координаты звезд α , δ .

В результате обработки наших наблюдательных данных мы получили каталоги для трех полос, содержащие 1096 звезд (полоса В), 627 звезд (V) и 404 звезды (R).

B band

Star name	Date	Polarized	P%	err P	Θ	Θ ref	$\bar{\delta}\Theta$	mean $\bar{\delta}\Theta$
HD 80558	17 apr	Strong	2.92	0.03	69.66	162 ^(2,4)	92.34	91.42
HD 80558	18 apr	Strong	2.9	0.02	70.23	162 ^(2,4)	91.77	
HD 80558	20 apr	Strong	2.98	0.15	70.76	162 ^(2,4)	91.24	
HD 94851	17 apr	none	0.13	0.06	131			
HD 98161	17 apr	none	0.32	0.2	68.65			
HD 111613	17 apr	Strong	2.88	0.03	169	81 ^(2,3)	92	
HD 111613	19 apr	Strong	2.89	0.02	170.27	81 ^(2,3)	90.73	
HD 292323	18 apr	Strong	4.82	0.06	57.56	148.6 ⁽¹⁾	91.34	
HD 147084	19 apr	Strong	3.5	0.07	121.61	32 ⁽³⁾	90.39	
HD 97689	20 apr	none	0.03	0.03	140.25			
HD 98161	20 apr	none	0.07	0.03	158.31			
hd110984	20 apr	Strong	5.14	0.04	0.06	91.6 ⁽¹⁾	91.54	

V band

Star name	Date	Polarized	P%	err P	Θ	Θ ref	$\bar{\delta}\Theta$	mean $\bar{\delta}\Theta$
HD 80558	17 apr	Strong	3.27	0.04	74.71	162 ^(2,4)	87.29	86.04
HD 80558	18 apr	Strong	3.19	0.04	75.58	162 ^(2,4)	86.42	
HD 80558	20 apr	Strong	3.26	0.07	76.46	162 ^(2,4)	85.54	
HD 94851	17 apr	none	0.07	0.05	156.61			
HD 98161	17 apr	none	0.09	0.1	133			
HD 111613	17 apr	Strong	2.99	0.13	176.18	81 ^(2,3)	84.82	
HD 111613	19 apr	Strong	1.9	0.2	174.26	81 ^(2,3)	86.74	
HD 292323	18 apr	Strong	4.65	0.86	62.28	148.6 ⁽¹⁾	86.32	
HD 147084	19 apr	Strong	4.15	0.03	126.73	32 ⁽³⁾	85.27	
HD 97689	20 apr	none	0.02	0.006	16.95			
HD 98161	20 apr	none	0.01	0.04	152.84			
HD 110984	20 apr	Strong	5.26	0.06	5.67	91.6 ⁽¹⁾	85.93	

R band

Star name	Date	Polarized	P%	err P	Θ	Θ ref	$\bar{\delta}\Theta$	mean $\bar{\delta}\Theta$
HD 80558	17 apr	Strong	3.28	0.08	72.24	162 ^(2,4)	89.76	89.01
HD 80558	18 apr	Strong	3.19	0.04	72.66	162 ^(2,4)	89.34	
HD 80558	20 apr	Strong	3.31	0.1	72.33	162 ^(2,4)	89.67	
HD 94851	17 apr	none	0.08	0.04	146			
HD 98161	17 apr	none	0.11	0.04	169			
HD 111613	17 apr	Strong	3.11	0.05	172.74	81 ^(2,3)	88.26	
HD 298323	18 apr	Strong	5.11	0.09	59.13	148.6 ⁽¹⁾	89.47	
HD 147084	19 apr	Strong	4.23	0.1	124.31	32 ⁽³⁾	87.69	
HD 97689	20 apr	none	0.05	0.06	82.86			
HD 98161	20 apr	none	0.09	0.04	18.98			
HD 110984	20 apr	Strong	5.63	0.03	2.71	91.6 ⁽¹⁾	88.89	

* 1-Turnshek (1990), 2-Hsu and Breger (1982), 3-Dolan and Tapia (1986), 4- Bastien (1988)

Таблица 1. Поляриметрические стандарты

4. Результаты

4.1. Поляриметрические карты

Таким образом были построены поляриметрические карты окрестностей глобулы BHR 113 в 5 полосах (см. рис. 16, 17, 18, 19, 20). Данные для В, V, R полос были взяты из полученных на основе наших наблюдательных данных каталогов. Данные для I и Н полос были предоставлены нам бразильскими коллегами, которые наблюдали глобулу BHR 113 в этих полосах ранее.

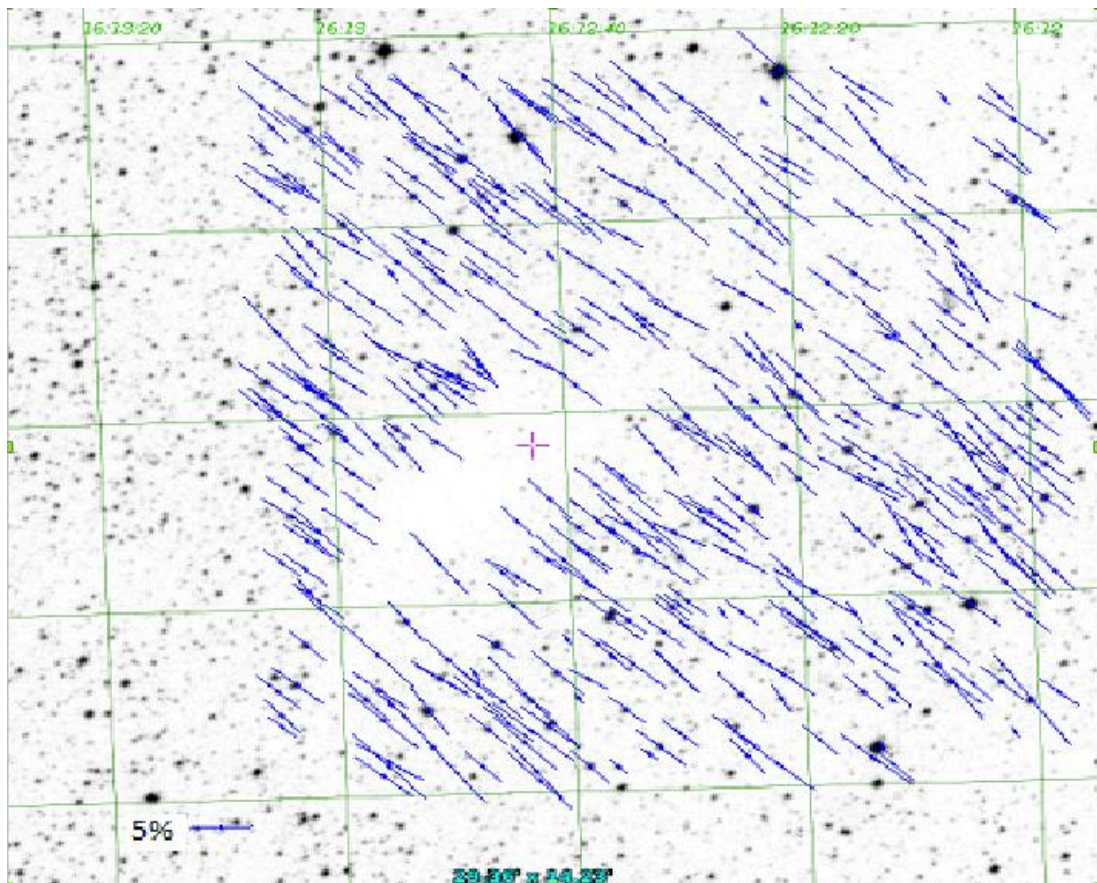


Рис. 16: Поляриметрическая карта BHR 113 в полосе В

Глядя на эти карты можно сделать вывод о том, что магнитное поле в окрестностях глобулы BHR 113 однородно. Рис. 21 демонстрирует зависимость степени поляризации излучения фоновых звезд от позиционного угла для

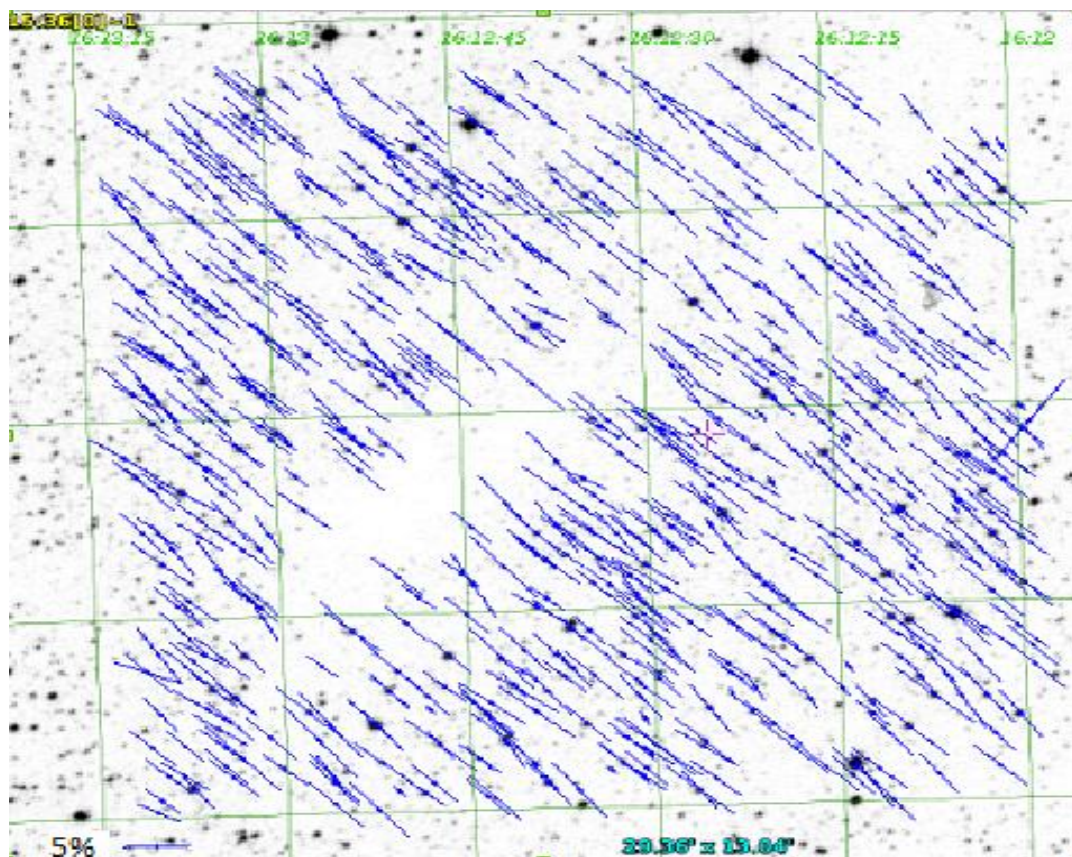


Рис. 17: Поляриметрическая карта BHR 113 в полосе V

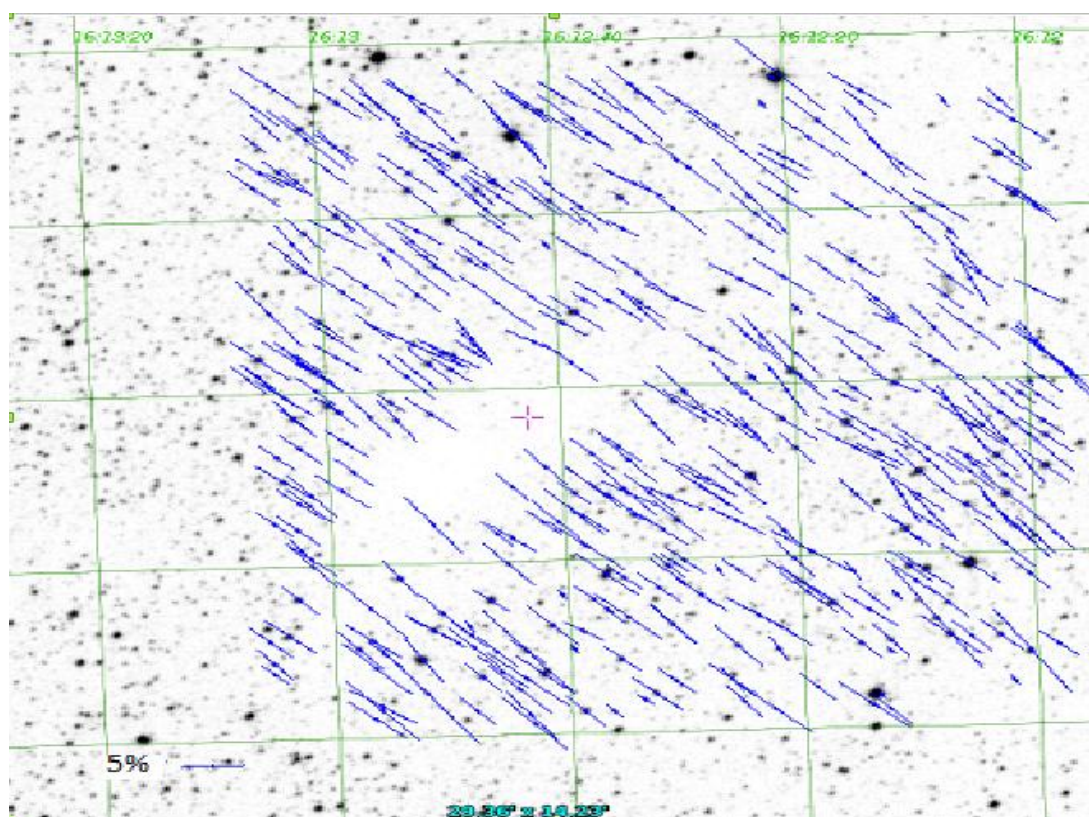


Рис. 18: Поляриметрическая карта BHR 113 в полосе R

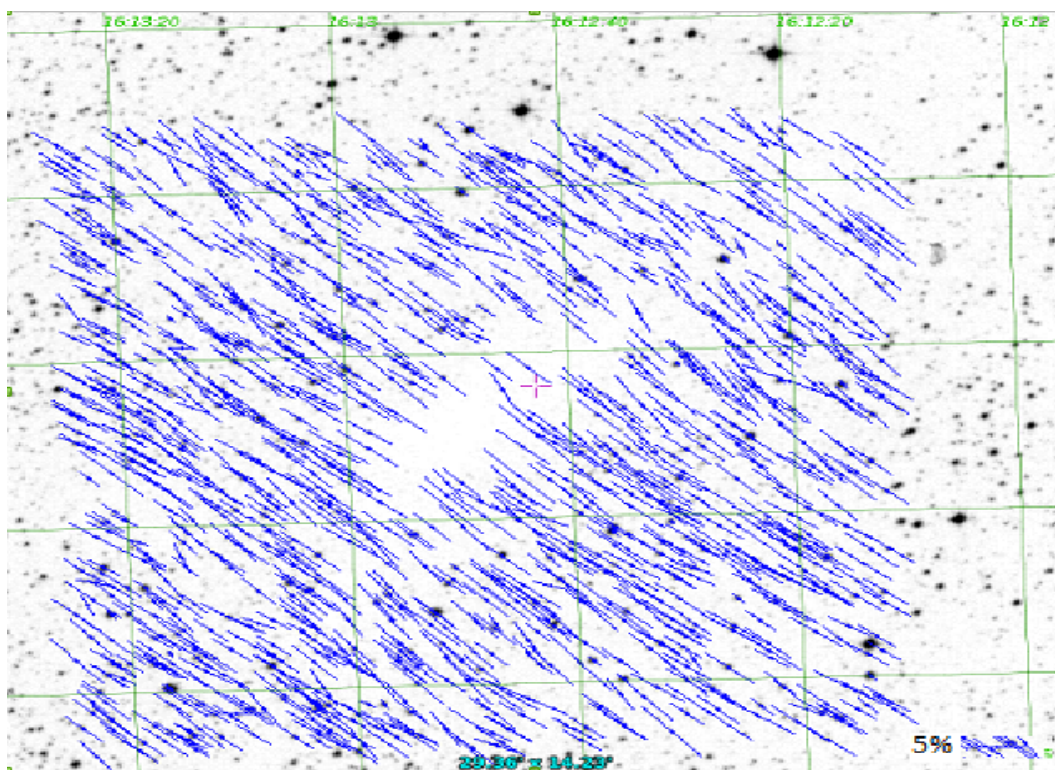


Рис. 19 Поляриметрическая карта BHR 113 в полосе I

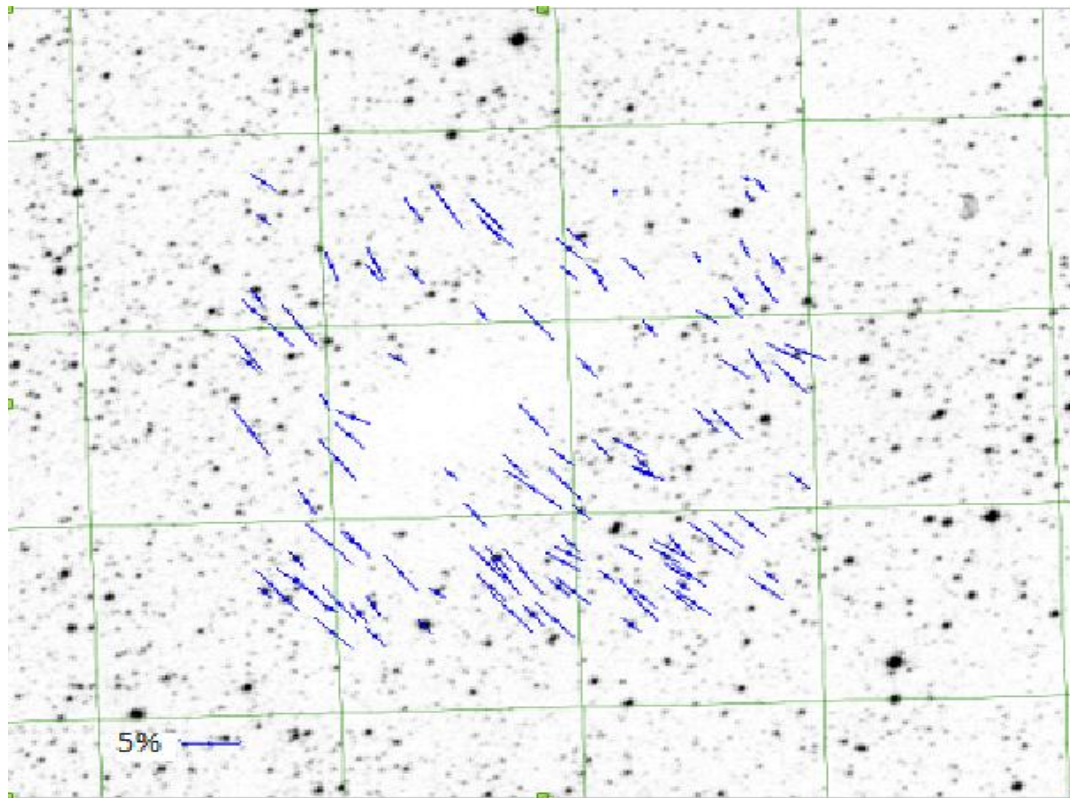


Рис. 20 Поляриметрическая карта BHR 113 в полосе H

полосы V. Отметим, что для других полос зависимость степени поляризации от позиционного угла выглядит похожим образом. Характер данной зависимости согласуется со сделанным нами выводом об однородности магнитного поля.

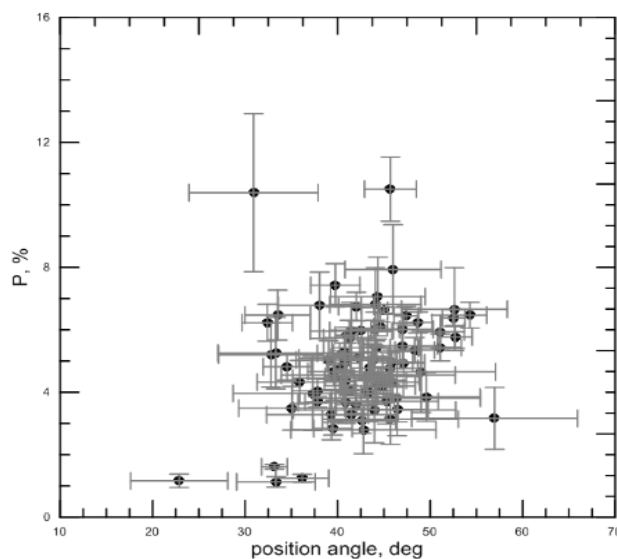


Рис. 21 Зависимость степени поляризации от позиционного угла

Опираясь на полученные каталоги, нами была сделана попытка определить список звезд, для которых удалось получить данные для всех пяти фильтров. К сожалению, таких звезд оказалось очень мало (порядка 10). Поэтому мы также рассмотрели звезды, для которых имелись данные в трех или четырех полосах. Для всех этих звезд мы попытались построить зависимости степени поляризации от длины волны и оценить параметры P_{\max} и λ_{\max} . На рис. 22 показана такая зависимость для трех звезд из нашего списка. Мы видим, что для разных звезд параметр λ_{\max} (длина волны, на которой степень поляризации достигает своего максимума) принимает разные значения. Это означает, что пылинки, которые ответственны за поляризацию света в окрестностях данных звезд, отличаются по размеру.

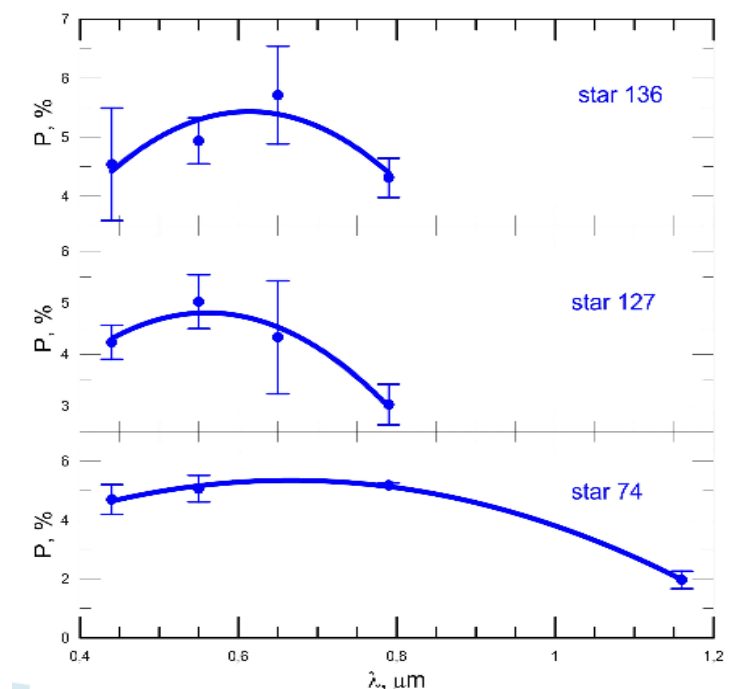


Рис. 22 Зависимость степени поляризации от длины волны

4.2. *Определение спектрального класса и расстояний до звезд и поглощения A_V*

В дополнение к поляриметрическим данным, полученным из наших наблюдений, мы собрали данные по фотометрии данных звезд из литературы. Используя эти фотометрические данные, мы определили спектральный класс и расстояния для звезд из наших каталогов, а также межзвездное поглощение.

4.2.1 *Истинные цвета и процедура интерполяции*

Первым шагом для фотометрической классификации звезд явилось собрание однородных данных об истинных цветах звезд разных спектральных классов. В книге Straizys (1992) имеются значения истинных цветов для следующих типов звезд:

1. звезды главной последовательности (V);
2. звезды гиганты (III);

3. звезды сверхгиганты (I).

В вышеуказанных работах представлены избытки цвета для истинных цветов (U-B)_o, (B-V)_o, (V-R)_o, (V-I)_o, (V-J)_o, (V-H)_o, (V-K)_o, (V-L)_o и (V-M)_o в системах Johnson и Cousins (см. для примера таблицу 2).

Sp.	Intrinsic color indices for luminosity III stars								
	(U-B) _o	(B-V) _o	(V-R) _o	(V-I) _o	(V-J) _o	(V-H) _o	(V-K) _o	(V-L) _o	(V-M) _o
G5	0.56	0.86	0.69	1.17	1.52	1.99	2.08	2.18	2.02
G8	0.7	0.94	0.70	1.18	1.56	2.04	2.16	2.27	2.09
K0	0.84	1.01	0.77	1.30	1.71	2.22	2.35	2.47	2.25
K1	1.01	1.08	0.81	1.37	1.80	2.34	2.48	2.61	2.36
K2	1.16	1.16	0.84	1.42	1.87	2.45	2.59	2.73	2.45
K3	1.39	1.29	0.96	1.61	2.12	2.76	2.92	3.07	2.75
K4	-	1.40	1.06	1.81	2.36	3.06	3.24	3.39	3.05
K5	1.81	1.51	1.20	2.10	2.71	3.47	3.67	3.83	3.47
M0	1.87	1.56	1.24	2.14	2.77	3.53	3.74	3.89	3.59
M1	1.88	1.58	1.29	2.24	2.89	3.69	3.90	4.06	3.72
M2	1.89	1.59	1.37	2.45	3.12	3.93	4.16	4.33	3.91
M3	1.88	1.60	1.52	2.82	3.53	4.38	4.63	4.81	4.39
M4	1.73	1.59	1.78	3.38	4.19	5.07	5.34	5.54	5.10
M5	1.58	1.56	2.13	4.06	4.96	5.89	6.20	6.44	6.00
M6	1.16	1.55	2.70	4.90	5.90	6.85	7.20	7.50	-

Таблица 2: UBVRIJHKLM истинные цвета для звезд гигантов.

Однако из таблицы 2 легко видеть, что данные имеются не для всех спектральных подклассов. Для того чтобы иметь возможность работать со звездами всех спектральных классов и разными системами, необходимо добавить недостающие данные, используя разумную интерполяцию.

Мы рассчитали значения истинных цветов для недостающих спектральных классов методом линейной интерполяции, используя написанную нами программу на Фортране, и получили в виде единой таблицы истинные цвета для всех подклассов в обеих системах. Эта таблица была включена в большую программу для определения спектрального класса, расстояния и поглощения A_v . Последние три параметра определялись минимизацией невязки между наблюдаемыми и табличными значениями потоков в выбранных полосах.

4.2.2 Фотометрические данные из различных каталогов

Мы собирали фотометрические данные из разных каталогов. Хотя многие из этих каталогов содержат некоторую общую информацию, у каждого есть свои особенности. Мы использовали каталоги:

1. **2MASS: The Two Micron All Sky Survey (2MASS).** Это обзор неба, который охватывает его в 3 полосах близкой инфракрасной области: J ($1.25\ \mu\text{m}$), H ($1.65\ \mu\text{m}$), and Ks ($2.17\ \mu\text{m}$). Проект был разработан для того, чтобы пополнить знания о ближнем инфракрасном небе. В дополнение к этому ожидалось, что 2MASS даст прямые ответы на насущные вопросы о крупномасштабной структуре нашей Галактики и о локальной Вселенной. Наблюдения проводились как в северном полушарии (Обсерватория имени Уиппла, Аризона, США), так и в южном (Межамериканская обсерватория Серро-Тололо, Атакама, Ла-Серена, Чили).
2. **NOMAD: The Naval Observatory Merged Astrometric Dataset.** База банных Военно-морской обсерватории США, все данные собраны из разных каталогов: Hipparcos, Tycho-2, UCAC2, и USNO-B. Так же и из 2MASS. Каталог содержит фотометрическую и астрометрическую информацию для миллиарда звезд. Нами были выбраны наиболее надежные данные (с наименьшими ошибками).
3. **DENIS: The Deep Near Infrared Survey of the Southern Sky.** Обзор южного неба в полосах I ($0.8\ \mu\text{m}$), J ($1.25\ \mu\text{m}$) и K ($2.16\ \mu\text{m}$). Так же как и для NOMAD, целью данного обзора было собрать фотометрические и астрометрические данные для звезд. Наблюдение проводились в Чили в обсерватории Ла-Силья на метровом телескопе с 1996 по 2001 гг.
4. **UCAC4: Fourth U.S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalogue.** Четвертая версия данного каталога. Наблюдения были завершены в 2004 году на станции Флагстафф военно-морской обсерватории США, но результаты были обработаны только в 2012 году. Данные дополнены сведениями из 2MASS каталога и обзора APASS (AAVSO Photometric All-Sky Survey), откуда были взяты значения в 5-полосах (B,V,g,r,i) для более

50 миллионов звезд. Для сбора данных о собственных движениях ярких звезд были использованы около 140 каталогов, в том числе Hipparcos и Tycho, а также все каталоги, используемые для правильного построения движения Tycho-2.

5. WISE: Wide-field Infrared Survey Explorer. Этот космический проект НАСА начат в 2009 году. Сделан обзор неба в 4 полосах средней инфракрасной области: W1 (3.4 μm), W2 (4.6 μm), W3 (12 μm) и W4 (22 μm). WISE имел несколько разных задач и научных целей. Его особенностью является то, что он работал с собственными полосами, которые не использовались в других проектах (или используются крайне редко).

Задача по сбору фотометрических данных из различных каталогов для звезд в окрестности глобулы BHR113 на данный момент не завершена (были найдены данные о примерно 70 звездах, но не выполнен их анализ) и будет продолжена в дальнейшем. В данной работе мы использовали в основном данные, полученные из каталога 2 MASS.

4.2.3 Фотометрическое JHK исследование звезд

На следующем этапе работы мы провели фотометрическое исследование звезд в окрестностях BHR 113, которые попали в наши поляриметрические каталоги (для которых удалось определить параметры P_{max} и λ_{max}). Целью данного исследования было получение следующих параметров:

- 1 - Спектральный класс (Sp. Type).
- 2 – Межзвездное поглощение (A_V).
- 3 - Расстояние (D).

Мы это сделали, используя зависимость (J-H)₀ от (H-K)₀ и данные обзора неба 2MASS. Такой подход хорошо описан в работе Eswaraiah et al. (2013). В рамках данного подхода строим диаграмму зависимостей показателей цвета (J-

H) от (H-K) (см. Рис. 23). Точками нанесены данные для звезд из каталога 2MASS. На кривой даны отметки для непокрасневших звезд. Отрезки от наблюдаемых точек до кривой показывают смещение покрасневших звезд вследствие межзвездного поглощения. Длина этих отрезков – это и есть поглощение A_v в известном масштабе, определяемом из закона межзвездного поглощения. Угол наклона отрезков нам известен из того же закона (Straizys, 1992). Таким образом, мы находим спектральный класс звезды и другие параметры. Отметим, что данный метод применим только для звезд, у которых J-K не превышает 0.75 зв.вел. Полученные результаты приведены в таблице 3.

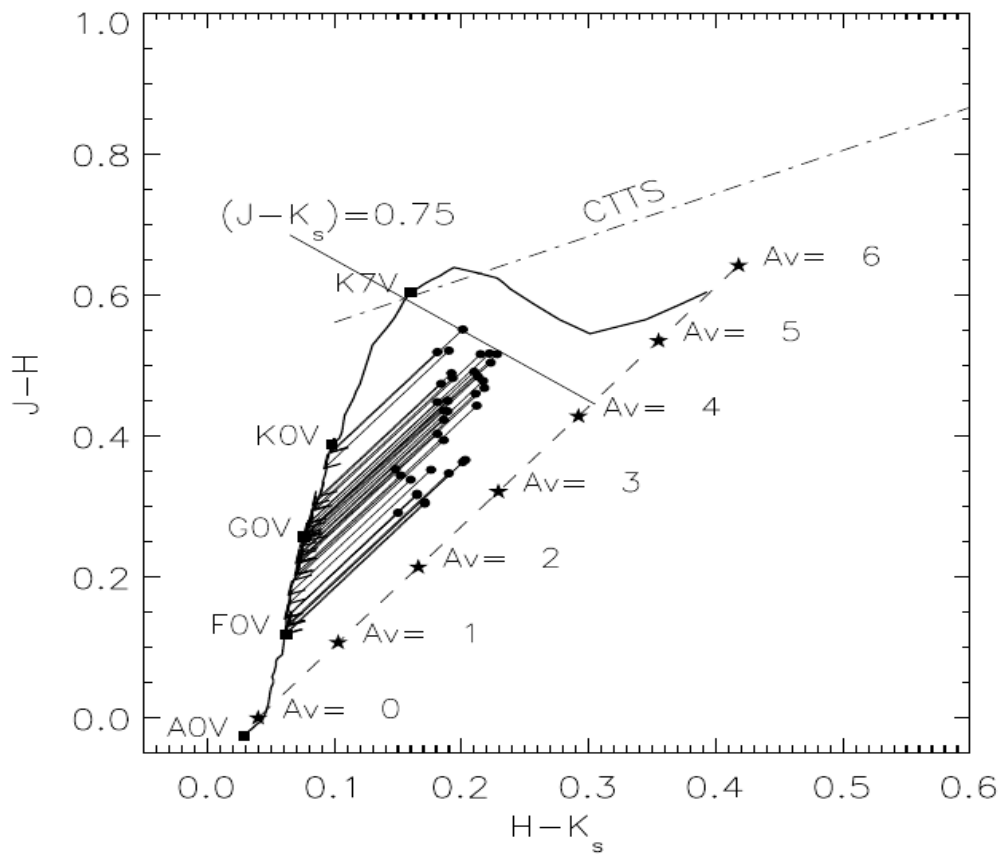


Рис. 23 Зависимость показателей цвета (J-H) vs (H-K)

Star No.	Av	Sp. Type	Mv	Distance
2	0.155	G1V	4.5	437.9
4	1.085	A8V	2.4	1677.2
5	3.503	A6V	2.2	401.8
7	2.387	K6V	8.2	41.8
9	2.697	F1V	2.8	763.8
14	0.961	F2V	3	212.1
15	1.178	F7V	3.8	588
29	0.465	G9V	5.7	420.7
37	2.294	F6V	3.7	251
40	1.488	G2V	4.7	419.7
42	1.488	F7V	3.8	917.9
44	2.48	F3V	3.1	671.7
46	0.465	F7V	3.8	426
48	0.806	F9V	4.2	292.9
50	2.697	A6V	2.2	826.8
51	1.426	F9V	4.2	959.8
63	2.728	A6V	2.2	626.9
64	3.038	A4V	2.05	834
65	1.798	F0V	2.6	1130.8
80	0.31	G9V	5.7	301.3
86	0.031	A2V	1.9	367.9
92	3.1	F0V	2.6	1138.1
93	3.317	F8V	4	121
94	0.31	G0V	4.4	999.5
95	1.798	F3V	3.1	978.5
97	2.573	A8V	2.4	1071.5
99	2.852	A9V	2.5	561.3
100	1.426	F0V	2.6	2763.1
102	3.146	A4V	2.05	1078.2
104	2.852	A6V	2.2	250.5
106	0.341	K7V	8.5	237.6
107	1.736	A8V	2.4	1341.5
113	0.976	F6V	3.7	515.3
117	2.666	F5V	3.4	570.1
119	3.1	A6V	2.2	902.4
126	1.581	A9V	2.5	799.1
131	1.178	F9V	4.2	615.1
133	3.565	A2V	1.9	813.5
134	2.201	F0V	2.6	1462.1
140	3.286	A5V	2.1	897.4
141	0.682	G4V	5	540.2
144	1.829	A6V	2.2	913.2
145	1.24	F9V	4.2	667.7
146	2.232	A2V	1.9	1621.8

Таблица 3 Межзвездное поглощение, спектральный класс, абсолютная звездная величина и расстояние для некоторых звезд

4.3. Связь поляризации и поглощения в области BHR113

Используя данные, полученные в параграфе 4.2, мы проанализировали связь поляризации и поглощения для звезд в окрестности глобулы BHR 113. В процессе анализа мы отбросили часть звезд, для которых ошибки определения поляризметрических или фотометрических параметров оказались слишком велики.

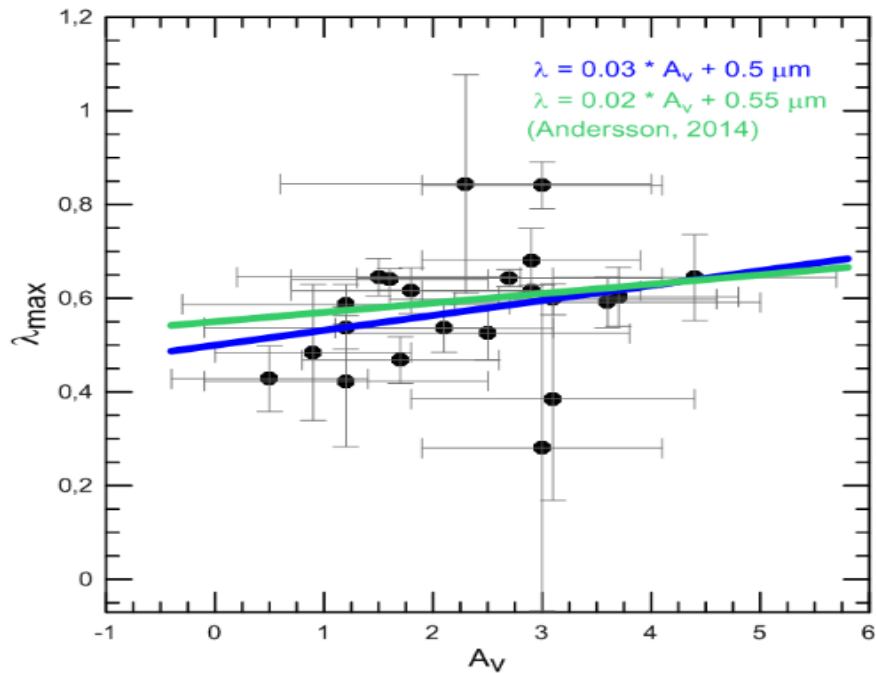


Рис. 24 Зависимость λ_{max} от поглощения A_v для глобулы BHR 113. Даны аппроксимации наших данных (точки и синяя прямая) и данных для других облаков (зеленая прямая) из работы Andersson et al. (2015).

Рис. 24 показывает зависимость длины волны, на которой поляризация принимает максимальное значение λ_{max} , от поглощения A_v . Как мы видим, при $A_v < 2$ зв.вел. λ_{max} возрастает с ростом A_v . Это означает, что в более плотных (внешних) областях глобулы размер пылинок, по-видимому, больше. Отметим, что наши результаты в целом достаточно неплохо согласуются с данными, приводимыми другими авторами для более массивных межзвездных облаков (см. Andersson, 2015).

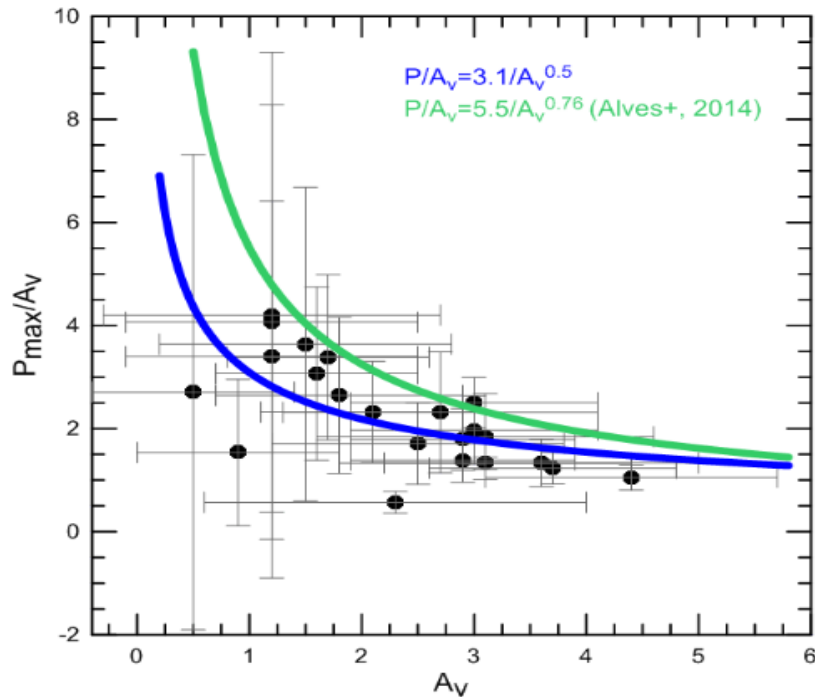


Рис. 25 Зависимость поляризующей способности от поглощения для глобулы BHR 113. Даны аппроксимации наших данных (точки и синяя кривая) и данных для других облаков (зеленая кривая) из работы Alves et al. (2014).

Рис. 25 показывает зависимость поляризующей способности от поглощения A_v . Уменьшение отношения P_{\max}/A_v с ростом A_v означает, что с ростом размера пылинок определенным образом уменьшается их способность поляризовать излучение. Alves в своей работе (Alves et al, 2014) приводит подобную зависимость для более массивных межзвездных облаков. Погрешность обеих величин (P_{\max}/A_v и A_v) у нас сравнительно велика из-за использованного упрощенного метода классификации звезд и пока неполного набора значений поляризации в полосах для большинства звезд. Таким образом, необходимы дополнительные наблюдения и более аккуратная фотометрическая классификация звезд, что запланировано в ближайшем будущем.

Заключение

В дипломной работе сделан краткий обзор методов поляризационного исследования межзвездных облаков, включая глобулы. Выполнена и описана полная обработка поляриметрических данных, полученных в полосах B, V, R для сотен звезд в области размером $\sim 10' \times 10'$ вокруг глобулы BHR 113. В результате получены детальные поляризационные карты, показывающие структуру магнитного поля в окрестности этой глобулы. Написана небольшая программа и в имеющихся обзорах неба и каталогах найдены сведения о фотометрии значительного числа наблюдавшихся звезд. По данным в фотометрических полосах J, H, K из обзора 2MASS проведена спектральная классификация 44 звезд, оценены расстояния до них и межзвездное поглощение A_V . Для этих же звезд по обработанным поляриметрическим данным, дополненным имеющимися аналогичными данными в полосах I и H, определены параметры волновой зависимости межзвездной линейной поляризации: P_{\max} и λ_{\max} . Рассмотрены и кратко обсуждены полученные соотношения между поглощением (A_V) и поляризацией (P_{\max} , λ_{\max}) света пылью в окрестности глобулы BHR 113.

Список литературы

1. Крайни Х., Ильин В.Б., Прокопьева М.С. (2015) Труды 44-й Международной студенческой научной конференции Физика космоса, с. 157
2. Alves et al. (2014) *Astron. Astrophys.*, **569**, L1
3. Andersson et al. (2015) *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **53**, 501
4. Bastien et al. (1988) *Astron. J.*, **95**, 900
5. Bhatt et al. (2004) *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **355**, 1272
6. Bourke et al. (1995) *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **276**, 1052
7. Cashman, Clemens (2014) *Astroph. J.*, **793**, 126
8. Clemens et al. (2012) *Astroph. J.*, **748**, 18
9. Crutcher (2012) *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **50**, 29
10. Dolan, Tapia (1986) *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **98**, 792
11. Draine, Fraisse (2009) *Astroph. J.*, **596**, 1
12. Draine (2011) *Physics of Interstellar and Intergalactic Medium*. Princeton Univ. Press, Princeton.
13. Draine (2015) *IAU Gen. Ass., Meet. #29*, id.2253136.
14. Eswaraiah et al. (2013) *Astron. Astrophys.*, **556**, A65
15. Forster et al. (2013) *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **428**, 1606
16. Fossati et al. (2007) *ASP Conference series*, **364**, 503
17. Goldsmith et al. (2007) *Astroph. J.*, **654**, 273
18. Hsu, Breger (1982) *Astroph. J.*, **262**, 732
19. Hull et al. (2013) *Astroph. J.*, **213**, 13
20. Jones et al. (1984) *Astrophys. J.*, **282**, 675
21. Joshi et al. (1985) *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **215**, 275
22. Kane, Clemens (1994) *APS Conf. Ser.*, **97**, 269
23. Lallement et al. (2014) *Astron. Astrophys.*, **561**, A91
24. Li et al. (2014) In *Protostars & Planets, VI* (eds. H. Beuther et al.). Univ. Arizona Press, Tucson, p. 101

25. Magalhaes (2012) PhD thesis, INPE, San Jose dos Campos.
26. Planck collaboration (2016) *Astron. Astrophys.*, **576**, A106
27. Puspitarini et al. (2014) *Astron. Astrophys.*, **566**, A13
28. Reipurth B. (2008) *Handbook of Star Forming Regions*, Vol. II. ASP
29. Reiss et al. (2014) *Astron. Astrophys.*, **566**, A65
30. Rodrigues et al. (2014) *IAU Symp N 302*, p.21
31. Ryden, B.S. (1996) *Astroph. J.*, **471**, 822
32. Schultz (2012) *From Dust to Stars*. 2nd ed. Springer, Berlin.
33. Skrutskie et al. (2006) *Astron. J.*, **131**, 1163
34. Stanimirovic et al. (2014) *Astroph. J.*, **793**, 132
35. Straizys (1992) *Multicolor Stellar Photometry*. Pachart Publ. House.
36. Turnshek et al. (1990) *Astron. J.*, **99**, 1243
37. Vrba et al. (1993) *Astroph. J.*, **105**, 1010
38. Wannier et al. (1999) *Astroph. J.*, **510**, 291
39. Whittet et al. (2002) *Astroph. J.*, **570**, 19
40. Whittet (2003) *Dust in the Galactic Enviroment*. 2nd ed. IOP Publ., Bristol.